

PENINGKATAN BATAS ARUS GAGAL PADA *SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER*

E. Sukirman, Wisnu Ari Adi, Didin S. Winatapura dan Yustinus P.

Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) - BATAN
Kawasan Puspipetek, Serpong 15314, Tangerang

ABSTRAK

PENINGKATAN BATAS ARUS GAGAL PADA *SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER*. Penelitian untuk meningkatkan batas arus gagal pada *superconducting fault current limiter* (SFCL) telah dilakukan. SFCL adalah *device* pembatas arus gagal, berfungsi sebagai pengaman jaringan listrik. SFCL pada dasarnya adalah sebuah transformator yang tersusun dari lilitan primer berupa kumparan kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa cincin superkonduktor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO). Dalam eksperimen ini digunakan trafo nomor 170, yakni trafo yang memiliki panjang teras $e = 8,5$ cm dan cincin YBCO dengan diameter dalam $d_i = 5,74$ cm, diameter luar $d_o = 8,09$ cm, tebal $t = 0,55$ cm, suhu kritis $T_c = 91$ K dan arus kritis $I_c = 3,52$ A. Pengujian SFCL dilakukan dengan menghubungkan secara seri SFCL, sumber tegangan ac dan beban $R_L = 250 \Omega$. Hasil pengujian SFCL menunjukkan bahwa batas arus gagal SFCL adalah $I_f = 0,15$ A. Padahal pada penelitian sebelumnya menggunakan trafo nomor 130, yakni trafo dengan panjang teras $e = 7,0$ cm dan cincin YBCO dengan diameter dalam $d_i = 2,44$ cm, diameter luar $d_o = 4,20$ cm, tebal $t = 0,86$ cm, suhu kritis $T_c = 91$ K dan arus kritis $I_c = 3,40$ A, batas arus gagalnya adalah $I_f \approx 0,03$ A. Batas arus gagal dapat ditingkatkan selain dengan memperbesar dimensi trafo dan cincin superkonduktor juga dengan menaikkan arus kritis superkonduktor.

Kata Kunci : Fault Current Limiter, Cincin YBCO, SFCL

ABSTRACT

THE INCREASE OF FAULT CURRENT LIMIT ON THE *SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER*. Research for increasing the fault current limit on the *superconducting fault current limiter* (SFCL) have been done. The SFCL is a fault current limiter device used as the electrical network security. The SFCL is essentially a transformer consists of a copper coil as the primary and superconducting rings of YBCO as the secondary windings. In this experiment the trafo of number 170, i.e. one with core length of $e = 8.5$ cm and the YBCO ring with inner diameter $d_i = 2.35$ mm, outer diameter $d_o = 4.07$ cm, thick $t = 0.68$ cm, critical temperature $T_c = 91$ K and critical current $I_c = 3.52$ A were used. The SFCL test circuit consists of the ac voltage source, the load of $R_L = 250 \Omega$ and SFCL each of one are connected in series. The experimental result shows that the limiting current is $I_f = 0.15$ A. While on the research beforehand used the trafo of number 130, i.e. one with core length of $e = 7.0$ cm and the YBCO ring with inner diameter $d_i = 2.44$ cm, outer diameter $d_o = 4.20$ cm, thick $t = 0.86$ cm, critical temperature $T_c = 91$ K and critical current $I_c = 3.40$ A, we get $I_f \approx 0.03$ A. Thus, the fault current limit can be increased beside by increasing the dimension of trafo and the STT ring also by increasing it's critical current.

Key words : Fault Current Limit, YBCO Ring, SFCL

PENDAHULUAN

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi dan meningkatnya jumlah penduduk, maka kebutuhan akan tenaga listrik semakin besar, baik di negara yang sedang berkembang maupun di negara maju. Hal ini ditunjukkan dengan terus dibangunnya jaringan-jaringan listrik baik di kota-kota besar maupun di pelosok pedesaan.

Untuk menghindari terjadinya kecelakaan akibat hubungan singkat pada jaringan listrik, kami mencoba mengembangkan suatu alat (*device*) pengaman jaringan listrik dengan memanfaatkan fenomena superkonduktivitas yang disebut dengan

Superconducting Fault Current Limiter (SFCL). Di luar negeri, beberapa prototipe SFCL telah berhasil diuji coba pada jaringan transmisi yang menyalurkan daya listrik hingga 100 kVA, hasilnya terbukti *feasible* secara teknis [1,2].

SFCL memiliki tofologi transformator dengan lilitan primer terdiri dari gulungan kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa cincin superkonduktor [3-8]. Prinsip kerja SFCL didasarkan pada transisi fasa superkonduktor yang cepat dari keadaan superkonduktif ke resistif. Impedansi SFCL akan selalu berharga mendekati nol Ohm, manakala medan magnet yang

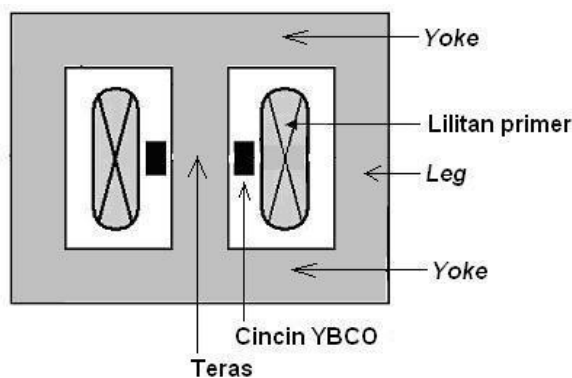
dibangkitkan oleh lilitan primer tidak melebihi medan magnet kritis superkonduktor (B_c), atau arus induksi pada cincin tidak melebihi arus kritis superkonduktor (I_c), atau suhu cincin tidak melebihi suhu transisi kritis superkonduktor (T_c). Jadi dalam keadaan normal, *SFCL* tidak membebani jaringan.

Namun apabila terjadi arus gagal, maka paling tidak ada satu dari tiga parameter superkonduktivitas (T_c , B_c , I_c) yang terlampaui harga kritisnya. Oleh karena itu ketika terjadi arus gagal, maka impedansi *SFCL* akan meningkat, sehingga aliran arus gagal pada jaringan dibatasi dan komponen-komponen atau peralatan listrik yang terpasang pada jaringan terlindungi dari kerusakan.

Pada penelitian terdahulu [7,8], *SFCL* skala laboratorium telah berhasil dibuat, dimana arus gagal yang dapat dibatasi adalah $I_f \approx 0,02$ A. Agar *SFCL* ini dapat digunakan pada jaringan listrik tegangan tinggi (orde kVA), maka *SFCL* tersebut harus dapat membatasi arus gagal hingga orde 10^3 A [1,5,6]. Masalahnya adalah bagaimana *reverse engineering* meningkatkan batas arus gagal pada *SFCL*, paling tidak pada tahap awal ini hingga orde 10^0 A.

TEORI

SFCL model induktif pada dasarnya adalah trafo dengan kumparan sekunder berupa cincin superkonduktor T_c tinggi (STT) yang ditumpuk sehingga menyerupai tabung dan selanjutnya disebut tabung STT. Jadi, *SFCL* adalah trafo dimana kumparan sekundernya dihubungkan-singkatkan. Tabung STT tersebut direndam di dalam N_2 -cair agar tabung STT menampilkan sifat superkonduktivitasnya. Oleh karena itu, bekerjanya *SFCL* ini bergantung pada suhu. Gambar 1 adalah penampang lintang *SFCL* model induktif.



Gambar 1. Penampang lintang SFCL

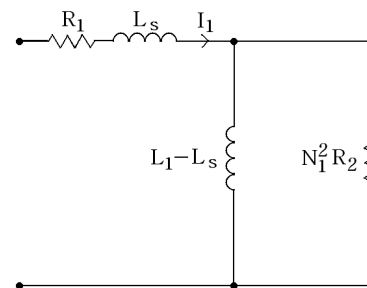
Rangkaian setara *SFCL* ditunjukkan pada Gambar 2 [5,9] dan impedansi *SFCL* memenuhi persamaan

$$Z_f = R_1 + \omega L_s + \frac{N_1^2 R_2(T, H) \omega (L_1 - L_s)}{\sqrt{\{N_1^2 R_2(T, H)\}^2 + \{\omega (L_1 - L_s)\}^2}} \dots (1)$$

$$\omega L_s = \frac{\omega \pi \mu_0 \mu_r}{h} (r_2^2 - r_{s2}^2) \dots (2)$$

$$\omega L_1 = \frac{\omega \pi \mu_0 N_1^2}{h} [r_2^2 + (\mu_r - 1) r_{co}^2] \dots (3)$$

dimana, R_1 = resistansi lilitan primer, L_s = induktansi bocor akibat adanya celah udara antara lilitan primer dan tabung STT, μ_0 = permeabilitas udara = $4\pi \times 10^{-7}$, μ_r = permeabilitas teras besi, L_1 = induktansi *SFCL*, $R_2(T, H)$ = resistansi tabung STT, N_1 = jumlah lilitan primer, h = tinggi kumparan primer, ω = frekuensi sudut arus bolak balik (ac), r_2 = jari-jari luar lilitan primer, r_{s2} = jari-jari luar cincin superkonduktor dan r_{co} = jari-jari teras besi.

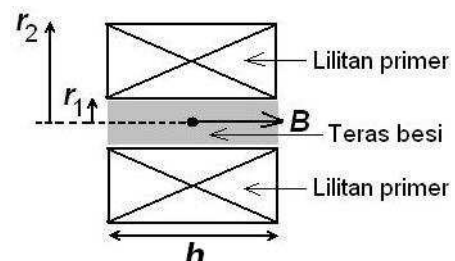


Gambar 2. Rangkaian setara SFCL

Sistem lilitan primer dan teras besi membentuk kumparan solenoidal. Medan magnet induksi yang dihasilkan pada pusat solenoid memenuhi persamaan :

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I_1 N_1}{2(r_2 - r_1)} \ln \left\{ \frac{\sqrt{r_2^2 + (h/2)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + (h/2)^2} + r_1} \right\} \dots (4)$$

dimana, B = medan magnet induksi, μ = permeabilitas teras, I_1 = arus primer, N_1 = jumlah lilitan primer, r_1 = jari-jari dalam lilitan primer, r_2 = jari-jari luar lilitan primer dan h = tinggi lilitan primer seperti yang terlihat pada Gambar 3 [8].



Gambar 3. Penampang lintang solenoid

Intensitas medan magnet induksi B fungsi arus primer I_1 dapat dihitung menggunakan persamaan (4). Tampak pada persamaan tersebut bahwa jika arus primer (arus sumber) I_1 atau tegangan sumber V_s terus dinaikan, maka medan magnet induksi B juga akan terus meningkat. Peningkatan B tersebut

Tabel 1. Spesifikasi SFCL

Komponen	Parameter	Simbol	Nilai		Satuan
			SFCL Sekarang	SFCL [7]	
Teras besi	Bahan	FeSi	-	FeSi	-
	Panjang	e	13,60	6,71	cm
	Lebar	l	3,00	2,23	cm
	Tebal	t	1,23	0,51	cm
	Jari-jari teras	r_{co}	1,08	0,99	cm
	Permeabilitas	μ	120	120	-
Yoke	Panjang	d	17,00	13,32	cm
	Lebar	b	2,20	2,21	cm
	Tebal	t	1,23	0,51	cm
Leg	Panjang	e	13,60	6,71	cm
	Lebar	a	1,50	2,22	cm
	Tebal	t	1,23	0,51	cm
Lilitan primer	Bahan	Cu	-	Cu	-
	Diameter	ϕ_k	0,2	0,05	cm
	Jari-jari luar	r_2	7,0	3,35	cm
	Jari-jari dalam	r_1	5,6	2,75	cm
	Tinggi	h	8,5	5,90	cm
	Jumlah lilitan	N_1	297	1250	lilitan

akan menyebabkan meningkatnya arus induksi pada cincin superkonduktor, sehingga akhirnya arus induksi itu akan melebihi harga arus kritis I_c cincin superkonduktor dan oleh karenanya terjadi transisi fasa superkonduktor ke keadaan resistif dari keadaan superkonduktif.

METODE PERCOBAAN

Bahan

Dalam eksperimen ini digunakan superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) sebagai cincin STT. Cuplikan dibuat melalui reaksi padatan dari percampuran oksida-oksida penyusun, yaitu : Y_2O_3 , $BaCO_3$, dan CuO [10]. Proses pencetakan cuplikan bentuk cincin pada prinsipnya sama dengan proses pencetakan cuplikan bentuk pelet biasa, namun ada beberapa bagian dari alat cetak tersebut yang harus dimodifikasi agar proses pelepasan cuplikan tidak mengalami kesulitan. Dimensi cincin YBCO ditunjukkan pada Tabel 2. Superkonduktivitas cuplikan diidentifikasi dengan mengukur perubahan resistivitas fungsi suhu ($\rho-T$) dan perubahan tegangan fungsi arus ($V-I$) menggunakan alat ukur *four point probe* (FPP) [11].

Tabel 2. Dimensi cincin YBCO : r_{s2} (jari-jari dalam), r_{s1} (jari-jari luar) dan t (tebal) cincin YBCO masing-masing sebelum dan sesudah *sintering*

Cuplikan	Dimensi Cuplikan (cm)					
	Sebelum sintering			Setelah sintering		
	r_{s2}	r_{s1}	t	r_{s2}	r_{s1}	t
Cincin YBCO	3,35	4,70	0,64	2,87	4,04	0,55

Pembuatan SFCL

Seperti telah ditunjukkan pada Gambar 1, *SFCL* dibuat dengan topologi trafo, yang terdiri dari komponen teras besi, *leg*, *koker*, *yoke*, lilitan kawat Cu (lilitan primer) dan cincin YBCO (lilitan sekunder). Dalam penelitian ini digunakan teras besi yang terdiri dari 24 buah pelat yang ditumpuk, tebal tiap pelat, $t_p = 0,051$ cm. Pelat besi dan kawat Cu tersebut diperoleh dari pasar lokal. Spesifikasi trafo ditunjukkan pada Tabel 1.

Identifikasi Pelat Besi

Pelat besi yang digunakan sebagai teras diidentifikasi menggunakan difraktometer sinar-x, radiasi $Cu-K_\alpha$ ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$). Hal ini dilakukan karena kualitas

Tabel 3. Spesifikasi bahan teras untuk transformator [12]

Tipe bahan	Kode pemakaian	Kandungan Si (%)	B_s (G)	Resistivita ρ ($10^{-7} \Omega\cdot m$)	Kerapatan D ($g\cdot cm^{-3}$)
M-19	Transformer 72	3,20	20.000	4,1-5,6	7,70-7,62
M-17	Transformer 65	3,40	19.900	4,5-5,8	7,68-7,60
M-15	Transformer 58	4,00	19.500	4,5-6,9	7,68-7,54
M-14	Transformer 52	4,50	19.200	5,8-6,9	7,60-7,54

transformasi medan elektromagnetik di dalam sebuah trafo bergantung pada kualitas bahan teras. Walaupun sifat magnetik bahan teras, antara lain medan magnet induksi saturasi (B_s) dan residu (B_r) dapat dilihat dari tampilan kurva histeresisnya, namun kurva histeresis bergantung pada komposisi dan kondisi metalurgi bahan. Sehingga data difraksi sinar-x dapat melengkapi data sifat magnetik bahan. Spesifikasi bahan teras untuk trafo ditunjukkan pada Tabel 3 [12].

Pengukuran Kurva Histeresis Teras Besi

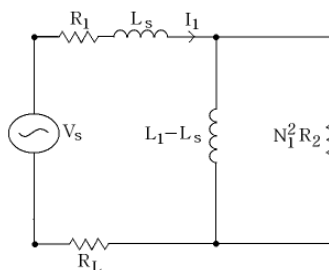
Perilaku bahan magnetik dalam lingkungan bermedan magnet dapat diketahui dari kurva histeresis (*hysteresis loop*). Kurva histeresis adalah kurva hubungan antara magnetisasi M atau induksi B terhadap medan magnet terpasang H , melalui persamaan :

$$B = \mu_0(H + M) \quad \dots\dots\dots (5)$$

Kurva histeresis sangat berguna untuk mengetahui sifat magnetik bahan sebagai fungsi medan magnet luar, suhu dan sudut pengukuran atau kondisi anisotropik bahan [13]. Kurva histeresis diukur pada cuplikan bahan (STT dan teras besi) yang berdimensi panjang \times lebar \times tebal : $(4,0 \times 4,0 \times 0,5)$ mm³ dengan VSM, tipe Oxford VSM1,2H.

Pengujian Unjuk Kerja SFCL

Gambar 4 adalah rangkaian untuk menguji karakteristik SFCL. Tampak pada gambar tersebut SFCL dihubungkan seri dengan rangkaian (jaringan) yang akan dilindungi dalam hal ini diwakili dengan beban R_L sedangkan R_1 diabaikan karena kecil ($< 1,0 \Omega$). Sehingga dari Gambar 4 dapat dituliskan harga impedansi total rangkaian uji $Z_T = R_L + Z_s$, dimana $R_L = 250 \Omega$. Tegangan sumber V_s divariasikan dari 0, 10, 20, 30, ..., 220 volt. Kemudian tegangan trafo (V_p) dan arus sumber (I_s) diukur secara simultan berturut-turut menggunakan multimeter digital : DT-830B, Sanwa CD-720E dan Clamp Meter-266. Besaran-besaran tersebut diukur pada suhu nitrogen cair. Dalam penelitian ini digunakan tegangan sumber dari regulator tegangan merek Matsunaga MFG. Preparasi STT dan SFCL dan pengukuran unjuk kerja SFCL dilakukan di laboratorium Bidang Bahan Maju, Puslitbang Iptek Bahan, BATAN, Cisaug.



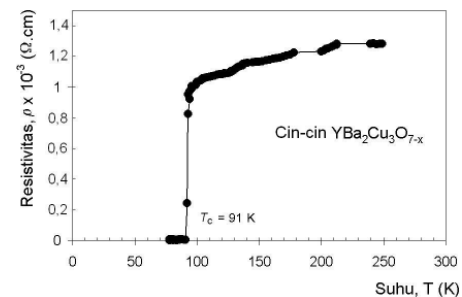
Gambar 4. Rangkaian untuk menguji unjuk kerja (karakteristik) SFCL

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva ρ - T diperoleh dengan mengukur tegangan sebagai fungsi perubahan suhu bahan. Kemudian data tegangan tersebut dikonversikan menjadi data resistivitas dengan menggunakan persamaan :

$$\rho = 2\pi.s.V.I^{-1}$$

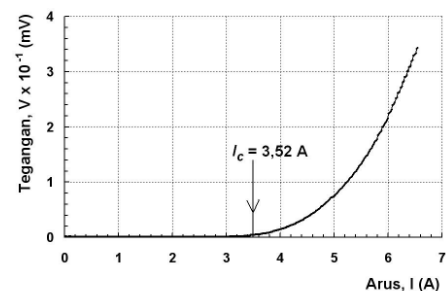
dimana I = arus yang dialirkan melalui dua *probe* luar, harganya tetap dalam eksperimen ini $I = 0,15$ A, V = tegangan antara dua *probe* dalam (diukur) dan s adalah jarak antar *probe*, dalam eksperimen ini $s \approx 0,2$ cm [11]. T_c cincin YBCO adalah 91 K, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva resistivitas ρ (Ω .cm) terhadap suhu T (K)

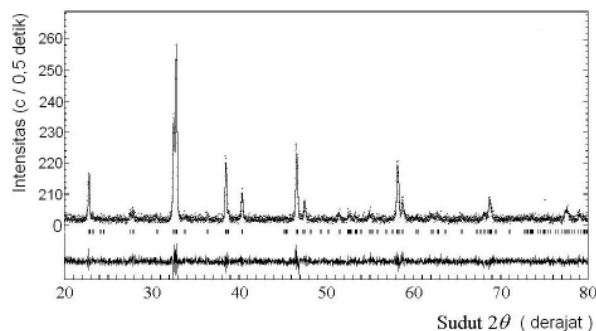
Tampak pada Gambar 5, ketika suhu bahan diturunkan dari suhu ruang menuju suhu nitrogen cair, terjadi transisi resistivitas yang tajam menuju resistivitas nol pada T_c . Jadi, pada bahan terjadi perubahan sifat transport listrik yang tiba-tiba dari resistif menjadi superkonduktif. Pada daerah $T > T_c$, bahan berperilaku sebagai logam biasa ($\rho > 0$) dan pada daerah suhu $T \leq T_c$, bahan berperilaku sebagai superkonduktor ($\rho \approx 0$).

Gambar 6 adalah kurva hubungan antara tegangan V dan arus I hasil pengukuran dengan *four point probe*. Pada gambar tersebut terlihat, pada awalnya tegangan $V \approx 0$ volt, walaupun arus dinaikan. Namun pada harga arus tertentu, tegangan $V > 0$ volt. Arus pada saat tegangan V mulai terdeteksi adalah arus kritis I_c cuplikan. Untuk cincin YBCO didapat $I_c = 3,52$ A dan dari hubungan $J_c = I_c.(\pi.s^2)^{-1}$ didapat $J_c \approx 28$ A/cm². Berdasarkan kedua jenis data di atas (Gambar 5 dan Gambar 6), disimpulkan bahwa cincin YBCO adalah superkonduktor.



Gambar 6. Kurva tegangan V (mV) terhadap arus I (A)

Pengukuran pola difraksi sinar-x metode analisis *Rietveld* dilakukan untuk mengkonfirmasi kemurnian fasa superkonduktor yang terbentuk di dalam cuplikan cincin YBCO. Analisis data dilakukan dengan asumsi bahwa cuplikan hanya mengandung fasa-123. Jadi, parameter input adalah parameter struktur kristal fasa-123. Profil pola difraksi hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 7. Tampak pada gambar tersebut, pola difraksi hasil kalkulasi (garis malar) berimpit dengan pola difraksi hasil observasi (garis titik-titik) dengan faktor R : $R_{WP} = 19,83$; $R_p = 12,68$; $R_1 = 10,8$; $R_F = 4,77$ dan $S = 1,12$. Faktor S cukup kecil bahkan lebih kecil dari nilai S standar *Rietveld* ($S_{std} = 1,30$). Ini berarti asumsi cuplikan hanya mengandung fasa-123 adalah benar. Dengan kata lain, cincin YBCO berfasa tunggal : $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.



Gambar 7. Profil pola difraksi sinar-x dari cuplikan cincin YBCO hasil analisis dengan metode *Rietveld*

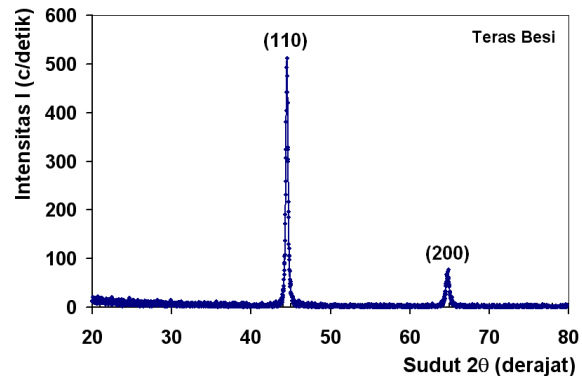
Karakterisasi menggunakan alat SEM (*Scanning Electron Microscope*) dimaksudkan untuk melihat strukturmikro cuplikan cincin YBCO. Gambar 8 adalah foto strukturmikro cincin YBCO. Tampak pada gambar tersebut, butir-butir berbentuk pelat tersusun secara acak (tidak bertekstur), yang mana merupakan ciri khas strukturmikro produk *sinter*.



Gambar 8. Foto SEM, strukturmikro cincin YBCO

Pola difraksi sinar-x dari cuplikan teras besi berbentuk pelat tipis ditunjukkan pada Gambar 9. Tampak pada gambar tersebut bahwa pada daerah sudut $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$ muncul dua puncak difraksi, masing-masing dengan parameter : 2θ (sudut hamburan), d (jarak antara bidang penghambur) dan I_r (intensitas relatif) seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Analisis kualitatif dilakukan

dengan metode *Hanawalt*, yakni mencocokkan dua parameter d dan I_r dengan data difraksi sinar-x pada JCPDS [14]. Hasil analisis menunjukkan bahwa pola difraksi sinar-x dari cuplikan teras besi paling sesuai dengan data pada JCPDS, Tabel No : 06-0696, yakni untuk cuplikan Fe (besi).

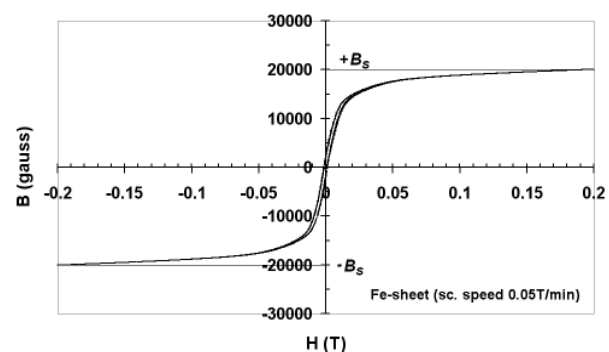


Gambar 9. Pola difraksi sinar-x dari teras besi berbentuk pelat tipis, tebal : 0,051 cm, radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$)

Tabel 4. Data parameter sudut hamburan 2θ ($^\circ$) jarak antara bidang d (\AA) dan intensitas relatif I_r (%) dari cuplikan teras besi, radiasi Cu-K α

No. Puncak	2θ ($^\circ$)	d (\AA)	I_r (%)	hkl
1	44,53	2,03	100	110
2	64,87	1,43	15	200

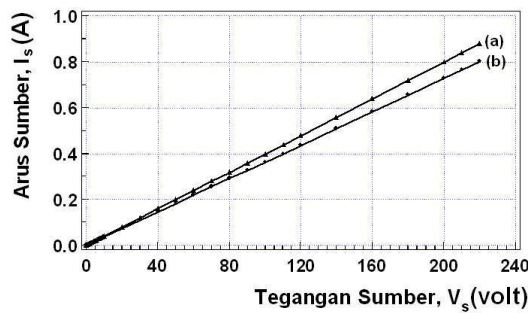
Dari kurva histeresis Gambar 10 didapat medan induksi saturasi cuplikan teras $B_s = 20.000$ gauss. Data ini dicocokkan dengan data pada Tabel 3 dan disimpulkan bahwa teras trafo ini adalah Fe-Si tipe M-19 dengan kandungan Si nominal 3,20 %. Jadi, unsur Si dalam teras trafo tidak terdeteksi dengan difraksi sinar-x. Tampak pada Gambar 10 bahwa dengan bertambahnya medan H , induksi magnetik B juga meningkat tetapi tidak secara linear, sehingga dijumpai induksi saturasi B_s pada medan $H \approx 20.000$ gauss. Jika medan H diturunkan perlahan-lahan ke nol, maka kurva induksi tidak kembali ke lintasan semula, melainkan menyusut dengan laju yang lebih



Gambar 10. Kurva histeresis teras besi. Cuplikan dipasang sejajar medan H dan $\Delta H/\Delta t = 0,05$ tesla per menit

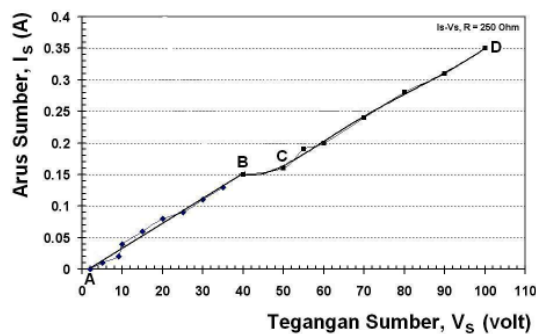
lambat. Akibatnya ketika H mencapai harga nol, induksi magnetik tidak nol, melainkan berada pada harga B_r yang selanjutnya disebut induksi remanen. Dalam penelitian ini didapat $B_r = 300$ gauss dan permeabilitas relatif $\mu_r = 120$. Untuk menghilangkan induksi remanen B_r , maka dipasang medan *reverse*- H_c , yakni medan yang membuat B_r berharga nol. Jika medan *reverse* terus dinaikkan besarnya, maka induksi remanen muncul kembali tetapi dengan harga negatif dan akhirnya dicapai induksi $-B_s$. Kurva induksi antara $+B_s$ dan $-B_s$ membentuk setengah *loop* simetris yang disebut kurva histeresis.

Impedansi rangkaian uji Z_T dapat dihitung menggunakan persamaan (1). Ada dua keadaan rangkain uji, yakni keadaan normal, dimana $R_2(T, H) = 0$ dan keadaan *fault*, dimana $R_2(T, H) = 0,03 \Omega$. Pada keadaan normal $Z_T \approx 250 \Omega$, tiada lain adalah beban rangkaian uji R_L . Dengan menggunakan relasi : $I_s = Z_T^{-1} \cdot V_s$, didapat kurva $I_s(V_s)$ pada Gambar 11 (a). Sedangkan pada keadaan *fault* diperoleh $Z_T \approx 274 \Omega$, tiada lain adalah beban rangkaian uji $R_L + Z_i$, dimana Z_i adalah impedansi *SFCL*. Dengan menggunakan relasi : , didapat kurva $I_s(V_s)$ pada Gambar 11 (b).



Gambar 11. Relasi $I_s(V_s)$ pada keadaan normal (a) dan keadaan *fault* (b)

Karakteristik *SFCL* hasil uji berdasarkan rangkaian Gambar 4, ditunjukkan pada Gambar 12. Tampak pada gambar tersebut, kurva $I_s(V_s)$ terdiri dari tiga segmen garis, yakni AB, BC dan CD yang masing-masing menggambarkan kondisi *SFCL* sebagai fungsi tegangan sumber V_s . Segmen AB adalah kondisi *SFCL* dalam keadaan normal, artinya *SFCL* tidak membebani



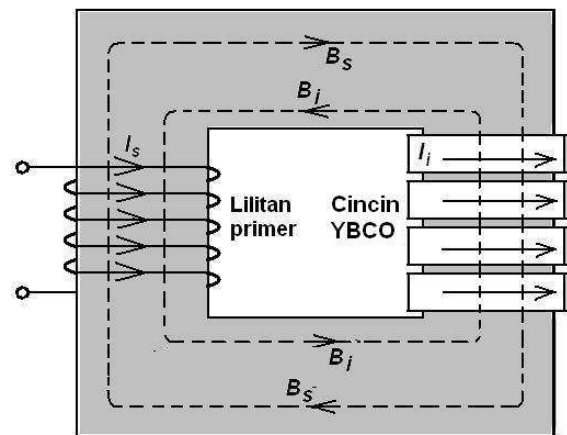
Gambar 12. Karakteristik *SFCL* dengan beban $R_L = 250 \Omega$.

rangkain uji. *Fitting* dengan *Microsoft Excel* pada garis AB diperoleh persamaan *linear*, $I_s = 0,004 V_s - 0,0065$; faktor $R = 0,992$. Koefisien arah persamaan tersebut adalah . Oleh karena itu impedansi total rangkaian uji adalah $Z_T = 250 \Omega$. Dari hubungan $Z_T \approx R_L + Z_i$, dimana $R_L = 250 \Omega$, maka didapat impedansi *SFCL*, yakni $Z_i \approx Z_T - R_L = 0 \Omega$. Jadi terbukti bahwa pada keadaan normal, *SFCL* tidak membebani rangkaian uji.

Segmen BC menggambarkan *SFCL* dalam keadaan transisi dari normal ke keadaan membebani rangkaian uji. *Fitting* dengan *Microsoft Excel* pada kurva BC diperoleh persamaan polinomial $I_s(V_s)$ derajat lima dengan faktor $R = 0,999$: . Di sisi lain fungsi $I_s(V_s)$ memenuhi hukum Ohm : dimana $Z_T \approx R_L + Z_i$ dan Z_i fungsi dari parameter transisi fasa superkonduktor $R_2(T, H)$. Dari sini dapat disimpulkan bahwa pada saat terjadi transisi fasa superkonduktor, resistansi $R_2(T, H)$ merupakan fungsi polinomial V_s . Transisi *SFCL* dari keadaan normal ke keadaan membebani, terjadi pada $V_s = 40$ volt dan arus $I_s = 0,15$ A. Dengan kata lain, arus gagal yang dapat dibatasi oleh *SFCL* ini adalah $I_f = 0,15$ A. Pada penelitian sebelumnya [7] digunakan trafo nomor 130, yakni trafo dengan spesifikasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1, dan cincin YBCO dengan diameter dalam $d_i = 2,44$ cm, diameter luar $d_o = 4,20$ cm, tebal $t = 0,86$ cm, suhu kritis $T_c = 91$ K dan arus kritis $I_c = 3,40$ A, didapat $I_f \approx 0,03$ A. Jadi pada penelitian sekarang, ada peningkatan batas arus gagal satu orde lebih tinggi.

Segmen CD menggambarkan *SFCL* dalam keadaan membebani rangkaian uji. *Fitting* dengan *Microsoft Excel* pada segmen CD diperoleh persamaan *linear* : $I_s = 0,0035 V_s - 0,0031$ dengan faktor $R = 0,995$. Koefisien arah persamaan tersebut adalah . Jadi, impedansi total rangkaian uji adalah $Z_T = 286 \Omega$. Dari hubungan $Z_T \approx R_L + Z_i$, dimana $R_L = 250 \Omega$, maka didapat impedansi *SFCL*, yakni $Z_i \approx Z_T - R_L = 36 \Omega$.

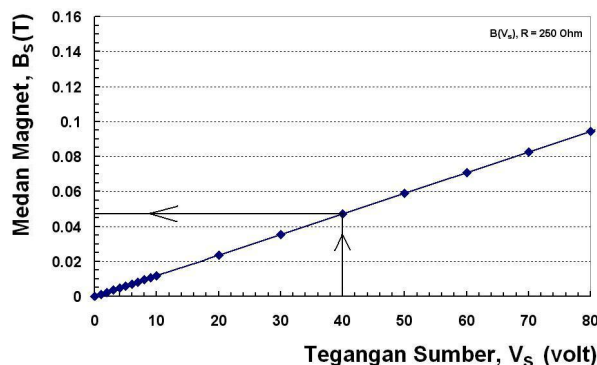
Berdasarkan Hukum Biot Savart : arus I_s yang mengalir pada lilitan primer menghasilkan medan magnet induksi B_s di sekitar lilitan tersebut yang arahnya seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Jadi, pada teras besi



Gambar 13. Penampang lintang *SFCL* menggunakan trafo mode U

muncul fluks magnetik $\phi_s = B_s A$, dimana A adalah luas penampang lintang teras. Karena arus I_s berubah terhadap waktu, maka medan magnet induksi B_s dan fluks magnetik ϕ_s juga berubah dengan waktu. Berdasarkan Hukum Imbas Faraday, pada kumparan sekunder STT akan muncul gaya gerak listrik $\varepsilon = -d\phi_s/dt$ yang menghasilkan arus induksi I_i . Arah gaya gerak listrik ε tersebut adalah sedemikian rupa sehingga melawan penyebab yang menghasilkannya (Hukum Lenz). Arus induksi I_i menghasilkan medan magnet induksi B_i dan fluks magnetik ϕ_i yang arahnya berlawanan dengan arah fluks ϕ_s . Manakala *SFCL* dioperasikan dalam keadaan normal, maka $\phi_s = \phi_i$. Sehingga fluks magnetik total pada teras besi $\phi_t = \phi_s - \phi_i = 0$. Oleh karena itu impedansi *SFCL* sangat rendah, karena fluks magnetik pada teras besi dapat dieliminasi.

Intensitas medan magnet induksi B_s fungsi tegangan sumber V_s dapat dihitung menggunakan persamaan (4). Data hasil perhitungan ditunjukkan pada Gambar 14. Tampak pada gambar tersebut bahwa jika tegangan sumber V_s terus dinaikan, maka arus sumber I_s yang mengalir pada kumparan primer juga meningkat dan oleh karenanya medan magnet B_s juga meningkat. Transisi keadaan *SFCL* dari normal ke keadaan membebani rangkaian uji terjadi pada $V_s = 40$ volt (Gambar 12) dan $B_s = 0,047$ T (Gambar 14). Ini berarti pada $V_s = 40$ volt terjadi transisi fasa YBCO dari fasa superkonduktor ke fasa logam. Seperti telah disinggung pada bagian pendahuluan di atas, bahwa transisi keadaan *SFCL* akan terjadi bila ada satu dari tiga parameter superkonduktivitas (T_c , B_c , I_c) yang terlampaui harga kritisnya dalam hal ini adalah I_c . Karena *SFCL* dioperasikan pada $T \approx 77$ K (suhu N_2 cair), maka jelas bahwa suhu operasi *SFCL* masih lebih kecil dari suhu kritis $T_c = 91$ K. Demikian pula, medan magnet induksi yang dibangkitkan lilitan primer (yakni $B_s = 0,047$ T), juga lebih kecil dari medan magnet kritis superkonduktor YBCO (yakni $B_c \approx 120$ T) [14]. Jadi, transisi *SFCL* dari keadaan normal ke keadaan membebani akan terjadi pada tegangan yang lebih tinggi dari 40 volt, jika harga arus kritis $I_c > 3,52$ A. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian L.S. Fleishman dan kawan-kawan [1]; dimana



Gambar 14. Hubungan antara B_s dan V_s

ditunjukkan bahwa dengan $I_c \approx 10^3$ A, transisi *SFCL* terjadi pada tegangan jaringan $V_s = 15$ kV dan arus gagal $I_f = 4.000$ A.

KESIMPULAN

SFCL adalah *device* pembatas arus gagal dengan topologi transformator yang tersusun dari lilitan primer berupa kumparan kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa cincin superkonduktor. Faktor penting untuk meningkatkan batas arus gagal adalah dimensi trafo dan arus kritis I_c cincin superkonduktor. Disarankan, arus kritis I_c cincin superkonduktor harus ditingkatkan hingga orde 10^3 A agar dapat dibuat prototipe *SFCL*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Ibu Dra. Mujamilah, M.Sc. atas bantuannya dalam penggunaan VSM dan semua pihak yang terkait dengan kegiatan penelitian ini, terutama Bapak Drs. Sumanto (Anggaran) beserta staf, Bapak Dr. Ridwan (Ka BBM) dan Bapak Drs. Gunandjar, SU (Ka P3IB).

DAFTARACUAN

- [1]. FLEISHMAN, L. S., BASHKIROV, Yu. A., ARESTEANU, V.A., BRISSETTE, Y., and CAVE, J. R., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1993) 570
- [2]. JOO, M., and KO, T. K., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **6** (1996) 62
- [3]. NORRIS, W.T., POWER, A., *Cryogenic* **37** (1997) 657-665
- [4]. CURRAS, S.R., SANTOS, R., DOMARCO, G., DIAZ, A., VEIRA, J.A., MAZA, J., FRANCOIS, M.X., VIDAL, F., *Cryogenic* **37** (1997) 653-655
- [5]. PAUL, W., BAUMANN, TH., RHYNER, J., and PLATTER, F., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1059-1062
- [6]. WILLEN, D. W. A., and CAVE, J. R., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1047
- [7]. SUKIRMAN, E., WISNU, A.A., WINATAPURA, D. S., dan SIREGAR, R. H., *Pembuatan dan Karakterisasi Superconducting Fault Current Limiter Skala Laboratorium*, Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir, Puslitbang Teknologi Maju, Yogyakarta, 23-24 Oktober 2003.
- [8]. WISNU, A.A., SUKIRMAN, E., WINATAPURA, D. S., dan YUSTINUS, P., *Pengaruh Medan Magnet Induksi terhadap Pembatasan Arus pada Superconducting Fault Current Limiter Skala Laboratorium*, Prosiding Pertemuan IPTEK Bahan'04, Serpong (2004)
- [9]. ZANNELLA, S., JANSACK, L., and DONADIO, P., *Cryogenics*, **37** (1997) 667-670

- [10]. E. SUKIRMAN, *Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen Pada Superkonduktivitas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$* , Tesis S2 Program Studi Materials Science, Fakultas Pascasarjana Universitas Indonesia, 1991
- [11]. WISNUARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **1**, (3), (2000)
- [12]. CHIN-WEN CHEN, *Magnetism And Metallurgy Of Soft Magnetic Materials*, Dover Publications, Inc., New York, (1986) 380-381
- [13]. MUJAMILAH, RIDWAN, M. REFAI MUSLICH, SETYO PURWANTO, M.I. MAYA FEBRI, YOHANNES, A.M, EDDY SANTOSO, HERRY MUGIRAHARDJO, *Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Tipe Oxford VSM1.2H*, Prosiding Seminar Nasional Bahan Magnet I, Puslitbang Iptek Bahan, BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang, 11 Oktober 2000.
- [14]. M. CYROT AND D. PAVUNA, *Introduction to Superconductivity and High- T_c Materials*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, (1992) 38

TANYAJAWAB

Horasdia Saragih, Fismatel - ITB

Pertanyaan

1. Apakah komponen lain yang ada di trafo tidak berubah sifatnya karena beroperasi pada suhu 77K
2. Apakah proyek ini menguntungkan ditinjau dari segi ekonomi

Jawab

1. Cincin YBCO diwadahi di dalam suatu wadah sedemikian sehingga bisa menampung nitrogen cair dan sekaligus merendam cincin. Jadi komponen lain tidak terpengaruhi oleh nitrogen cair.
2. Karena alat pendinginnya dari nitrogen cair dan harga nitrogen cair 50 kali lebih murah dari alat pendingin helium cair, maka SFCL ini relatif lebih murah karena harga nitrogen cair Rp. 6000,- per liter

Setyo Purwanto, Puslitbang Iptek Bahan - BATAN

Pertanyaan

1. Apa pengaruh dimensi trafo terkait dengan kualitas bahan YBCO yang harus dengan metode *melt growth*.

Jawaban

1. Kendala yang dihadapi adalah cincin YBCO yang harus memiliki $J_c \sim 10^6$ A/cm. Jadi harus digunakan cincin produk *melting*. Namun ketika cincin YBCO dilelehkan, maka akan terjadi perubahan bentuk cincin (yakni tidak lagi bulat simetris).